

BEST AVAILABLE COPY

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-158216

(43)Date of publication of application : 31.05.2002

(51)Int.Cl.

H01L 21/3065  
 B01J 19/08  
 C23C 16/52  
 H01L 21/205  
 H05H 1/46

(21)Application number : 2001-010781

(71)Applicant : TOKYO ELECTRON LTD  
 YASAKA YASUNORI

(22)Date of filing : 18.01.2001

(72)Inventor : ISHII NOBUO  
 YASAKA YASUNORI

(30)Priority

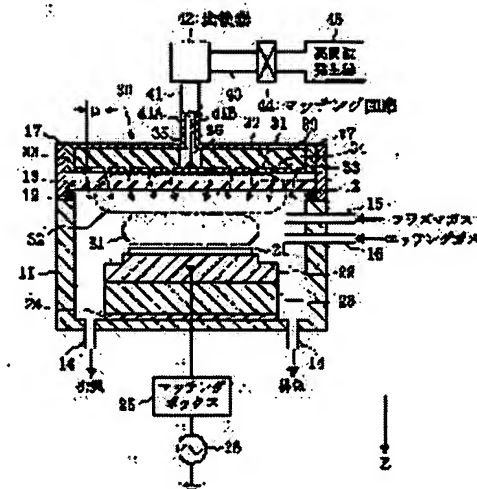
Priority number : 2000270545    Priority date : 06.09.2000    Priority country : JP

(54) PLASMA PROCESSOR AND METHOD THEREOF

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To improve the distribution of a plasma generated by a high frequency electromagnetic field.

SOLUTION: The plasma processor uses a slot antenna 30 for radiating an electromagnetic field in a process chamber 11 from a plurality of slots 34 on a radiation surface 31. The slot antenna 30 radiates the electromagnetic field in a direction inclined to the normal Z on its radiation surface 31.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 24.08.2001  
[Date of sending the examiner's decision of rejection] 03.02.2004  
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]  
[Date of final disposal for application]  
[Patent number]  
[Date of registration]  
[Number of appeal against examiner's decision of rejection] 2004-04409  
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection] 04.03.2004  
[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-158216

(P2002-158216A)

(43) 公開日 平成14年5月31日 (2002.5.31)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード(参考)
H 0 1 L 21/3065		B 0 1 J 19/08	H 4 G 0 7 5
B 0 1 J 19/08		C 2 3 C 16/52	4 K 0 3 0
C 2 3 C 16/52		H 0 1 L 21/205	5 F 0 0 4
H 0 1 L 21/205		H 0 5 H 1/46	L 5 F 0 4 5
H 0 5 H 1/46		H 0 1 L 21/302	B
		審査請求 有 請求項の数17 O L (全 18 頁)	

(21) 出願番号 特願2001-10781(P2001-10781)

(22) 出願日 平成13年1月18日 (2001.1.18)

(31) 優先権主張番号 特願2000-270545(P2000-270545)

(32) 優先日 平成12年9月6日 (2000.9.6)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000219967

東京エレクトロン株式会社

東京都港区赤坂5丁目3番6号

(71) 出願人 599019546

八坂 保能

京都府宇治市木幡須留5-107

(72) 発明者 石井 信雄

東京都港区赤坂五丁目3番6号 TBS放送センター 東京エレクトロン株式会社内

(72) 発明者 八坂 保能

京都府宇治市木幡須留5-107

(74) 代理人 100064621

弁理士 山川 政樹

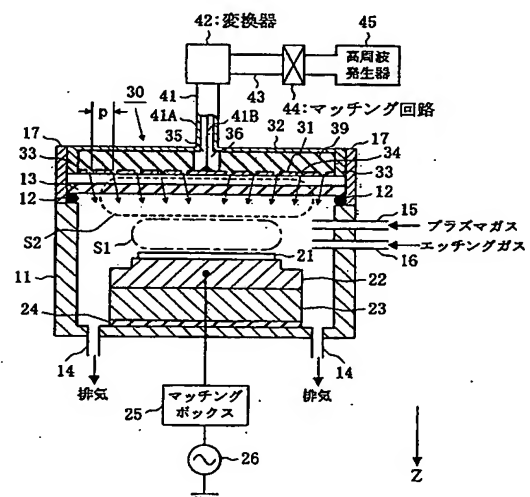
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 プラズマ処理装置及び方法

(57) 【要約】

【課題】 高周波の電磁界により生成されたプラズマの分布を改善する。

【解決手段】 放射面31に形成された複数のスロット34より処理容器11内に電磁界を放射するスロットアンテナ30を用いたプラズマ処理装置であって、スロットアンテナ30が、その放射面31の法線方向Zに対して傾斜する方向に電磁界を放射する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 処理容器内に収容され被処理体を配置する載置面を有する載置台と、この載置台の載置面に対向配置され放射面に形成された複数のスロットより前記処理容器内に電磁界を放射するスロットアンテナとを備えたプラズマ処理装置において、

前記スロットアンテナは、前記放射面の法線方向に対して傾斜する方向に前記電磁界を放射することを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 2】 請求項 1 記載のプラズマ処理装置において、

前記スロットアンテナ内部の比誘電率  $\epsilon_v$  と前記スロットアンテナ外部の比誘電率  $\epsilon_a$  との比  $\epsilon_v/\epsilon_a$  を  $\epsilon_r$ 、前記スロットアンテナ内部を伝搬する電磁界の波長を  $\lambda_g$ 、前記スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向における隣接スロット間のピッチを  $p = \alpha \cdot \lambda_g$  ( $\alpha > 0$ ) とし、 $N$  を 0 以上の整数とすると、

$$-1 \leq \epsilon_r^{1/2} (N/\alpha - 1) \leq 1$$

かつ  $N$  が 1 以上の場合に、 $N \neq \alpha$  を満たすように  $\epsilon_r$ 、 $N$ 、 $\alpha$  が設定されていることを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 3】 請求項 2 記載のプラズマ処理装置において、

前記隣接スロット間のピッチは、前記スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向で変化していることを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 4】 請求項 1～3 何れか 1 項記載のプラズマ処理装置において、

前記スロットアンテナと前記載置台の載置面とを隔離するように配置され前記スロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有する誘電体部材を更に有することを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 5】 請求項 4 記載のプラズマ処理装置において、

前記誘電体部材は、ドーム状をしていることを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 6】 請求項 4 記載のプラズマ処理装置において、

前記誘電体部材は、処理容器の内面の少なくとも一部を前記載置台の載置面から隔離することを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 7】 請求項 1～3 何れか 1 項記載のプラズマ処理装置において、

前記スロットアンテナと前記載置台の載置面とを隔離するように配置され前記スロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有する第 1 の誘電体部材と、

この第 1 の誘電体部材に対して前記載置台と異なる側に配置され前記第 1 の誘電体部材と共に密閉空間を形成する第 2 の誘電体部材と、

前記密閉空間に流体を流通させて前記第 1 の誘電体部材

の温度調整をする流通手段とを更に有することを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 8】 請求項 1～7 何れか 1 項記載のプラズマ処理装置において、

前記スロットアンテナは、互いに離間して対向配置された第 1 及び第 2 の導体板と、外周部で前記第 1 の導体板と前記第 2 の導体板との間をシールドするリング部材とを備え、前記第 1 の導体板に前記複数のスロットが形成され、前記第 1 の導体板と前記第 2 の導体板との間に電磁界を導入する導入口が前記第 2 の導体板の中央部に形成されたラジアルアンテナであることを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 9】 請求項 1～7 何れか 1 項記載のプラズマ処理装置において、

前記スロットアンテナは、矩形導波路の一面に前記複数のスロットが形成された矩形導波路アンテナであることを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 10】 スロットアンテナの放射面より処理容器内に電磁界を放射し、この電磁界で生成されたプラズマにより被処理体に対して所定の処理を行うプラズマ処理方法において、

前記スロットアンテナが前記放射面の法線方向に対して傾斜する方向に前記電磁界を放射することを特徴とするプラズマ処理方法。

【請求項 11】 請求項 9 記載のプラズマ処理方法において、

前記スロットアンテナ内部の比誘電率  $\epsilon_v$  と前記スロットアンテナ外部の比誘電率  $\epsilon_a$  との比  $\epsilon_v/\epsilon_a$  を  $\epsilon_r$ 、前記スロットアンテナ内部を伝搬する電磁界の波長を  $\lambda_g$ 、前記スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向における隣接スロット間のピッチを  $p = \alpha \cdot \lambda_g$  ( $\alpha > 0$ ) とし、 $N$  を 0 以上の整数とすると、

$$-1 \leq \epsilon_r^{1/2} (N/\alpha - 1) \leq 1$$

かつ  $N$  が 1 以上の場合に、 $N \neq \alpha$  を満たすように  $\epsilon_r$ 、 $N$ 、 $\alpha$  を設定することを特徴とするプラズマ処理方法。

【請求項 12】 請求項 11 記載のプラズマ処理方法において、

前記スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向で前記隣接スロット間のピッチを変えて、この方向で電磁界の放射方向を変えることにより、プラズマの分布を調整することを特徴とするプラズマ処理方法。

【請求項 13】 請求項 10 記載のプラズマ処理方法において、

前記スロットアンテナと前記被処理体とを隔離する誘電体部材から前記スロットアンテナまでの距離を変えて、電磁界の放射方向を変えることにより、プラズマの分布を調整することを特徴とするプラズマ処理方法。

【請求項 14】 請求項 10～12 何れか 1 項記載のプラズマ処理方法において、

前記スロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有し前記スロットアンテナと前記被処理体とを隔離する誘電体部材を配置することを特徴とするプラズマ処理方法。

【請求項 15】 請求項 14 記載のプラズマ処理方法において、

前記誘電体部材をドーム状に形成することを特徴とするプラズマ処理方法。

【請求項 16】 請求項 14 記載のプラズマ処理方法において、

前記誘電体部材で処理容器の内面の少なくとも一部を前記被処理体から隔離することを特徴とするプラズマ処理方法。

【請求項 17】 請求項 10～12 何れか 1 項記載のプラズマ処理方法において、

前記スロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有する第 1 の誘電体部材で前記スロットアンテナと前記被処理体とを隔離し、

この第 1 の誘電体部材に対して前記被処理体と異なる側に第 2 の誘電体部材を配置して前記第 1 及び第 2 の誘電体部材により密閉空間を形成し、

前記密閉空間に流体を流通させて前記第 1 の誘電体部材の温度を調整することを特徴とするプラズマ処理方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、高周波の電磁界によりプラズマを生成して所定の処理を行うプラズマ処理装置及び方法に関する。

【0002】

【従来の技術】 半導体装置やフラットパネルディスプレイの製造において、酸化膜の形成や半導体層の結晶成長、エッチング、またアッシングなどの処理を行うために、プラズマ処理装置が多用されている。これらのプラズマ処理装置の中に、アンテナから処理容器内へ高周波の電磁界を導入して高密度プラズマを発生させる高周波プラズマ処理装置がある。この高周波プラズマ処理装置は、プラズマガスの圧力が比較的低くても安定してプラズマを生成することができるので、用途が広いという特色がある。

【0003】 図 20 は、従来の高周波プラズマ処理装置を用いたエッチング装置の構成を示す図である。この図 20 では、一部構成について断面構造が示されている。円筒形状の処理容器 111 の上部開口に、誘電体板 113 が水平配置されている。これらの接合部にシール部材 112 を介在させることにより、処理容器 111 内部の気密性を確保している。処理容器 111 の底部には真空排気用の排気口 114 が設けられ、また処理容器 111 の側壁にはガス供給用のノズル 116 が設けられている。処理容器 111 内には、エッチング対象の基板 121 を置くための載置台 122 が収容されている。この載

置台 122 はバイアス用の高周波電源 126 に接続されている。

【0004】 また、誘電体板 113 上部にはラジアルアンテナ 130 が配設されている。誘電体板 113 及びラジアルアンテナ 130 の周囲はシールド材 117 によって覆われている。ラジアルアンテナ 130 は、ラジアル導波路 136 を形成する互いに平行な 2 枚の導体板 131、132 と、これらの導体板 131、132 の外周部を接続するリング部材 133 とから構成される。放射面を構成する導体板 131 には、スロット 134 が多数形成されている。ラジアル導波路 136 内を伝搬する電磁界の波長（以下、管内波長という）が  $\lambda_g$  であるとき、径方向における隣接スロット間のピッチ  $p_2$  は管内波長と同じ  $\lambda_g$  に設定される。また、導体板 132 の中央部には、ラジアル導波路 136 内に電磁界を導入する導入口 135 が形成されている。この導入口 135 には導波路 141 を介して高周波発生器 145 が接続されている。

【0005】 次に、このエッチング装置の動作を説明する。まず、処理容器 111 内を所定の真空度にした後、ノズル 116 から例えば  $CF_4$  と  $Ar$  との混合ガスを流量制御して供給する。この状態で、高周波発生器 145 から導波路 141 を介して、高周波の電磁界をラジアルアンテナ 130 に供給する。ラジアルアンテナ 130 に供給された電磁界はラジアル導波路 136 の内部を伝搬しつつ、導体板 131 に形成された多数のスロット 134 から放射される。径方向における隣接スロット間のピッチ  $p_2$  が  $\lambda_g$  に設定されているので、この電磁界は導体板 131（放射面）に対してほぼ垂直方向に放射される。そして、誘電体板 113 を透過して、処理容器 111 内に導入される。

【0006】 処理容器 111 内に導入された電磁界の電界は、処理容器 111 内のガスを電離させて、処理対象の基板 121 の上部空間 S1 にプラズマを生成する。このとき、処理容器 111 内に導入された電磁界のすべてが直接プラズマ生成によって吸収されるわけではない。吸収されずに残った電磁界は、処理容器 111 内で反射を繰り返して、ラジアルアンテナ 130 とプラズマ生成空間 S1 との間の空間 S2 に定在波を形成する。この定在波の電界もプラズマ生成に関与することが分かっている。このようにして生成されたプラズマのイオンは、載置台 122 の負電位によって引き出されて、エッチング処理に利用される。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】 図 20 に示した従来のエッチング装置では、空間 S2 に形成された定在波がプラズマ生成に与える影響が大きい。この定在波の電界分布を制御することは困難であるので、従来のエッチング装置ではプラズマを均一に生成することができなかった。例えば、このエッチング装置で処理容器 111 内に

生成されたプラズマを観察したところ、後掲する図10(a)に示されるように、プラズマ発生領域160の中央付近に、プラズマが高密度に発生する部分161A、161Bが確認された。このため、従来では、処理対象の基板121で、プラズマが高密度になっている下の領域ほど、エッチング処理が速く進行するという問題が発生していた。このような処理量に斑が生じるという問題は、図20に示したエッチング装置だけでなく、従来のプラズマ処理装置に共通する問題であった。

【0008】本発明は、以上のような問題点を解決するためになされたものであり、その目的は、高周波の電磁界により生成されたプラズマの分布を改善することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するために、本発明のプラズマ処理装置は、放射面に形成された複数のスロットより処理容器内に電磁界を放射するスロットアンテナを用いたプラズマ処理装置であって、スロットアンテナが、その放射面の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射することを特徴とする。誘電体板がアンテナ放射面に平行に配置されている場合、電磁界は誘電体板の法線方向に対して傾斜する方向に放射される。また、処理容器内において誘電体板と対向するプラズマ面はこの誘電体板に沿った形状となるので、スロットアンテナから誘電体板を介して処理容器内のプラズマに直接入射する電磁界は、このプラズマ面の法線方向に対して傾斜する方向に入射することになる。プラズマと誘電体板との境界からプラズマ密度がカットオフ密度となる地点に至るまでの電磁界の電界変化を簡単に説明すると、プラズマ面に平行な方向成分の強度はほぼ一定値を維持するが、プラズマ面の法線方向成分の強度は単調に大きくなって行く。したがって、電磁界をプラズマ面の法線方向に対して傾斜する方向に入射させることにより、プラズマ面の法線方向に入射させた場合と比較して、両成分を合成した電界強度を大きくさせることができる。これにより、スロットアンテナから直接入射した電磁界の電界によるプラズマ生成効率を向上させることができる。これにより、スロットアンテナから処理容器内に直接入射した電磁界の電界によるプラズマ生成への寄与が大きくなるので、処理容器内に形成される定在波の電界によるプラズマ生成への関与が相対的に低くなる。前者は後者よりも制御が容易であるので、プラズマの分布を従来よりも改善することができる。

【0010】上述したプラズマ処理装置では、スロットアンテナ内部の比誘電率 $\epsilon_v$ とスロットアンテナ外部の比誘電率 $\epsilon_a$ との比 $\epsilon_v/\epsilon_a$ を $\epsilon_r$ 、スロットアンテナ内部を伝搬する電磁界の波長を $\lambda_g$ 、スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向における隣接スロット間のピッチを $p = \alpha \cdot \lambda_g$  ( $\alpha > 0$ ) とし、 $N$ を0以上の整数とすると、

$$-1 \leq \epsilon_r^{1/2} (N/\alpha - 1) \leq 1$$

かつ  $N$ が1以上の場合に、 $N \neq \alpha$ を満たすように $\epsilon_r$ 、 $N$ 、 $\alpha$ を設定するとよい。これにより、スロットアンテナの放射面の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界が放射される。ここで、前記隣接スロット間のピッチは、スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向で変化していてもよい。これにより、電磁界の放射方向に分布をもたせて、プラズマの分布を調整することができる。

【0011】また、スロットアンテナと載置台の載置面とを隔離するように配置され、スロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有する誘電体部材を更に有するようにしてもよい。ここで、誘電体部材は、ドーム状をしていてもよい。また、誘電体部材は、処理容器の内面の少なくとも一部を載置台の載置面から隔離するものであってもよい。あるいは、スロットアンテナと載置台の載置面とを隔離するように配置されスロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有する第1の誘電体部材と、この第1の誘電体部材に対して載置台と異なる側に配置され第1の誘電体部材と共に密閉空間を形成する第2の誘電体部材と、この密閉空間に流体を流通させて第1の誘電体部材の温度を調整する流通手段とを更に有するようにしてもよい。ここで、第2の誘電体部材は、第1の誘電体部材とスロットアンテナとの間に配置されてもよいし、スロットアンテナの給電線途中に配置されてもよい。

【0012】また、スロットアンテナとして、互いに離間して対向配置された第1及び第2の導体板と、外周部で第1の導体板と第2の導体板との間をシールドするリング部材とを備え、第1の導体板に複数のスロットが形成され、第1の導体板と第2の導体板との間に電磁界を導入する導入口が第2の導体板の中央部に形成されたラジアルアンテナを使用してもよい。また、スロットアンテナとして、矩形導波路の一面に複数のスロットが形成された矩形導波路アンテナを使用してもよい。

【0013】また、本発明のプラズマ処理方法は、スロットアンテナが放射面の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射して処理容器内に電磁界を供給し、この電磁界で生成されたプラズマにより被処理体に対して所定の処理を行うことを特徴とする。これにより、プラズマの分布を従来よりも改善することができる。このプラズマ処理方法では、スロットアンテナ内部の比誘電率 $\epsilon_v$ とスロットアンテナ外部の比誘電率 $\epsilon_a$ との比 $\epsilon_v/\epsilon_a$ を $\epsilon_r$ 、スロットアンテナ内部を伝搬する電磁界の波長を $\lambda_g$ 、スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向における隣接スロット間のピッチを $p = \alpha \cdot \lambda_g$  ( $\alpha > 0$ ) とし、 $N$ を0以上の整数とすると、

$$-1 \leq \epsilon_r^{1/2} (N/\alpha - 1) \leq 1$$

かつ  $N$ が1以上の場合に、 $N \neq \alpha$ を満たすように $\epsilon_r$ 、 $N$ 、 $\alpha$ を設定するとよい。これにより、スロットアンテナの放射面の法線方向に対して傾斜する方向に電磁

界を放射することができる。ここで、スロットアンテナ内部での電磁界の伝搬方向で隣接スロット間のピッチを変えて、この方向で電磁界の放射方向を変えることにより、プラズマの分布を調整するようにしてもよい。

【0014】また、スロットアンテナと被処理体とを隔離する誘電体部材からスロットアンテナまでの距離を変えて、電磁界の放射方向を変えることにより、プラズマの分布を調整するようにしてもよい。また、スロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有しスロットアンテナと被処理体とを隔離する誘電体部材を配置するようにしてもよい。ここで、この誘電体部材をドーム状に形成してもよい。また、誘電体部材で処理容器の内面の少なくとも一部を被処理体から隔離するようにしてもよい。あるいは、スロットアンテナの放射面に対して傾斜する面を有する第1の誘電体部材でスロットアンテナと被処理体とを隔離し、この第1の誘電体部材に対して被処理体と異なる側に第2の誘電体部材を配置して第1及び第2の誘電体部材により密閉空間を形成し、この密閉空間に流体を流通させて第1の誘電体部材の温度を調整するようにしてもよい。ここで、第2の誘電体部材を、第1の誘電体部材とスロットアンテナとの間に配置してもよいし、スロットアンテナの給電線途中に配置してもよい。

#### 【0015】

【発明の実施の形態】次に、図面を参照して、本発明の実施の形態を詳細に説明する。

(第1の実施の形態) まず、本発明をエッチング装置に適用した例を説明する。図1は、本発明の第1の実施の形態であるエッチング装置の構成を示す図である。この図1では、一部構成について断面構造が示されている。また、説明の都合上、垂直方向をZ軸方向と定義する。

【0016】図1に示したエッチング装置は、上部が開口している円筒形状の処理容器11を有している。この処理容器11は、アルミニウムなどの導体部材で形成されている。処理容器11の上部開口には、平板状に成形された誘電体板13が水平に配置されている。この誘電体板13には、厚さ20～30mm程度の石英ガラス又は(A1<sub>2</sub>O<sub>3</sub>又はAlN等の)セラミックなどが用いられる。処理容器11と誘電体板13との接合部はリングなどのシールド部材12を介在させており、これにより処理容器11内部の気密性を確保している。

【0017】処理容器11の底部には、真空ポンプ(図示せず)に連通する排気口14が設けられており、処理容器11内部を所望の真空度にすることができる。また、処理容器11の側壁には、処理容器11内にArなどのプラズマガスを導入するためのプラズマガス供給ノズル15と、CF<sub>4</sub>などのエッチングガスを導入するための処理ガス供給ノズル16とが上下に設けられている。これらのノズル15、16は石英パイプなどで構成されている。処理容器11内には、エッチング対象の基

板(被処理体)21を配置する載置面を有する載置台22が収容されている。この載置台22は、処理容器11の底部に絶縁板24を介して固設された支持台23上に固定されている。また、載置台22はマッチングボックス25を介して、バイアス用の高周波電源26に接続されている。この高周波電源26は、例えば2～13.56MHzの高周波を発生する。

【0018】また、誘電体板13上部には、スロットアンテナの1つであるラジアルアンテナ30が、放射面(後述する導体板31)を下にして配設されている。このラジアルアンテナ30は、誘電体板13を介して処理容器11内に高周波の電磁界を放射するものである。ラジアルアンテナ30は、誘電体板13により処理容器11から隔離されており、処理容器11内で生成されるプラズマから保護されている。また、誘電体板13及びラジアルアンテナ30の周囲は、円筒形状のシールド部材17によって覆われている。このシールド部材17は、例えばアルミニウムなどの金属で形成されている。ラジアルアンテナ30から放射された電磁界は、このシールド部材17により遮蔽されるので、エッチング装置の外部に漏れることはない。

【0019】ラジアルアンテナ30は、同軸線路41、矩形・同軸変換器42及び矩形導波管43を介して、高周波発生器45に接続されている。この高周波発生器45は、例えば2.45GHzの高周波を発生するものである。なお、高周波発生器45の出力周波数は1GHz～10数GHzの範囲内であればよい。また、矩形導波管43の途中にインピーダンスのマッチングを行うマッチング回路44を設けることにより、電力の使用効率を向上させることができる。

【0020】次に、ラジアルアンテナ30の構成について、さらに説明する。図1に示すように、ラジアルアンテナ30は、放射面を構成する第1の導体板31と、この導体板31に対して上方位置に対向配置された第2の導体板32と、導体板31、32の外周部を接続して導体板31、32間をシールドするリング部材33とから構成されている。アンテナ上面をなす導体板32の中央部には、2枚の導体板31、32により構成されるラジアル導波路36内に高周波発生器45からの高周波の電磁界を導入する導入口35が形成されている。また、アンテナ下面をなす導体板31には、多数のスロット34が形成されている。この導体板31は誘電体板13に平行に配置されている。

【0021】ラジアル導波路36内を伝搬する電磁界の波長(以下、管内波長という)が $\lambda_g$ であるとき、2枚の導体板31、32の間隔は $\lambda_g/2$ 未満に設定される。例えば周波数が2.45GHzの高周波を使用する場合、ラジアル導波路36内の比誘電率 $\epsilon_v$ が1であれば、導体板31、32の間隔は6cm未満となる。 $\lambda_g/2$ 未満とすることにより、導体板31、32間に定在波

が形成されることを防止することができる。ただし、2枚の導体板31、32間の放電を防止するため、導体板31、32間の間隔を $0.5/(\epsilon_v)^{1/2}$  cm以上とすることが望ましい。

【0022】以上の導体板31、32及びリング部材33は、銅又はアルミニウムなどの導体により形成される。なお、導体板31、32の間すなわちラジアル導波路36内に、図1に示すようにセラミックなどの誘電体部材（比誘電率 $\epsilon_v > 1$ ）39を配置してもよい。上述したように、ラジアルアンテナ30には、高周波発生器45に接続された同軸線路41が接続されている。この同軸線路41の外部導体41Aは、導体板32の導入口35周縁に接続されている。また、同軸線路41の内部導体41Bの先端は円錐状に成形され、この円錐の底部が導体板31の中心に接続されている。

【0023】図2は、ラジアルアンテナ30の放射面をなす導体板31の一構成例を示す図である。ここで、図2(a)は、導体板31全体の平面図、図2(b)は、導体板31の径方向において隣り合う2つのスロット34の拡大図である。図2(a)に示すように導体板31には、略周方向に延びるスロット34が、導体板31の中心の周りに同心円状に多数形成されている。この同心\*

$$p/\lambda_g + (p \cdot \cos \theta)/\lambda = N$$

ここで、 $\theta$ は放射角度（導体板31に平行な方向と電磁界51A、51Bの放射方向とのなす角度）、 $\lambda$ は真空中における電磁界51A、51Bの波長、 $N$ は自然数で※

$$p = \alpha \cdot \lambda_g \quad (\alpha > 0)$$

また、比誘電率が $\epsilon_v$ であるラジアル導波路36内を伝

$$\lambda_g = \lambda / \epsilon_v^{1/2} = \lambda / \epsilon_r^{1/2}$$

で表されるので、(2)式及び(3)式を(1)式に代

$$\cos \theta = \epsilon_r^{1/2} [(N/\alpha) - 1]$$

【0027】(4)式より、 $\epsilon_r$ 、 $N$ 、 $\alpha$ は

$$-1 \leq \epsilon_r^{1/2} [(N/\alpha) - 1] \leq 1$$

の関係を満たす必要がある。このとき、角度 $\theta$ が

$$\theta = \cos^{-1} [\epsilon_r^{1/2} [(N/\alpha) - 1]]$$

となる方向で電磁界51A、51Bの位相がそろい、この方向に電磁界が放射されることになる。しかし、

(4)式において $N = \alpha$ のとき、 $\cos \theta = 0$ すなわち $\theta = (2M - 1)\pi/2$  ( $M$ は自然数)となり、垂直方向に電磁界51A、51Bが放射されることになる。したがって、径方向における隣接スロット間のピッチ $p$ を、

(5)式を満たすと共に $N \neq \alpha$ となるように設計する★

$$N/[1 + (1/\epsilon_r^{1/2})] \leq \alpha \leq N/[1 - (1/\epsilon_r^{1/2})] \quad \dots (7)$$

となるので、 $\epsilon_r = 9$ のとき、 $N$ と $\alpha$ との関係は

$$3/4 \times N \leq \alpha \leq 3/2 \times N$$

で表される。図4は、(8)式により規定される $N$ と $\alpha$ との関係を棒グラフで表した図である。ただし、上述したように $N = \alpha$ のとき垂直放射となるので、図4では $N = \alpha$ の点を白丸で示し、除外している。

【0029】図4では、 $\alpha < N$ （各棒グラフにおける白

\*円の半径は等差数列的に増えている。この同心円の半径の増加分を、径方向（すなわち、ラジアル導波路36内における電磁界の伝搬方向）における隣接スロット間のピッチ $p$ と定義する。この径方向における隣接スロット間のピッチ $p$ は、導体板31の法線方向すなわち垂直方向に対して傾斜する方向に電磁界が放射されるように設定される。

【0024】以下に、ピッチ $p$ の設計方法を説明する。ただし、誘電体板13はラジアルアンテナ30の放射面（導体板31）から十分離れて配置され、ラジアルアンテナ30外部の等価比誘電率 $\epsilon_a$ は1に近似できるものとする。この条件下では、ラジアルアンテナ30内部（すなわちラジアル導波路36）の比誘電率 $\epsilon_v$ の値は、 $\epsilon_v$ と $\epsilon_a$ との比 $\epsilon_r$  ( $= \epsilon_v / \epsilon_a$ )と等しくなる。

【0025】図3は、径方向における隣接スロット間のピッチ $p$ の設計方法の説明図である。電磁界の放射方向とは、放射された電磁界が強め合う方向である。電磁界の強め合いは、図3を用いて言えば、A点から放射される電磁界51Aと、A点からB点を経由してC点に達する電磁界51Bとが同じ位相となったときに起こる。その条件は(1)式に示すようになる。

$$\dots (1)$$

※ある。

【0026】いま、ピッチ $p$ を(2)式のように定義する。

$$\dots (2)$$

搬する電磁界の波長 $\lambda_g$ は、

$$\dots (3)$$

入して整理すると、(4)式が得られる。

$$\dots (4)$$

$$\dots (5)$$

$$\dots (6)$$

★とにより、垂直方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射させることができる。

【0028】以下、具体例を示す。まず、ラジアル導波路36内に $Al_2O_3$  ( $\epsilon_v = \epsilon_r = 9$ ) からなる誘電体部材39が配置されている場合を示す。(5)式を変形すると、

$$\dots (7)$$

$$\dots (8)$$

丸の左側)で放射角度 $\theta$ が鋭角になり、 $\alpha > N$ （各棒グラフにおける白丸の右側)で放射角度 $\theta$ が鈍角になる。したがって、各棒グラフが相互に重なる部分（網目を付した部分）では、鋭角及び鈍角の両方向に電磁界が放射されることになる。なお、各棒グラフの左端は放射角度



$\theta = 0^\circ$ 、右端は放射角度  $\theta = 180^\circ$  となり、放射された電磁界は導体板31に沿った伝搬となる。 $\alpha$ が大きくなると、(2)式よりスロット間のピッチ  $p$  が大きくなり、それに応じて導体板31に形成できるスロット34の数が少なくなり、電磁界の放射効率が低くなる。このため実用上は、 $N=1$ 、 $0.75 \leq \alpha \leq 1.5$ 、 $\alpha \neq 1$  とするのが望ましい。図5は、この条件下における放射角度  $\theta$  のスロットピッチ  $p$  依存性を示す図である。横\*

$$-1 \leq (N/\alpha) - 1 \leq 1$$

すなわち、

$$\alpha \geq N/2$$

となる。図6は、(10)式により規定される  $N$  と  $\alpha$  との関係の棒グラフで表した図である。ただし、上述したように  $N=\alpha$  のとき垂直放射となるので、図6では  $N=\alpha$  の点を白丸で示し、除外している。

【0031】図6では、 $\alpha < N$  (各棒グラフにおける白丸の左側) で放射角度  $\theta$  が鋭角になり、 $\alpha > N$  (各棒グラフにおける白丸の右側) で放射角度  $\theta$  が鈍角になる。また、各棒グラフが相互に重なる部分(網目を付した部分)では、複数の方向に電磁界が放射されることになる。なお、各棒グラフの左端は放射角度  $\theta = 0^\circ$ 、右端(図示せず)は放射角度  $\theta = 180^\circ$  となり、放射された電磁界は導体板31に沿った伝搬となる。上述した例と同じ理由から、実用上は、 $N=1$ 、 $0.5 \leq \alpha \leq 2$ 、 $\alpha \neq 1$  とするのが望ましい。図7は、この条件下における放射角度  $\theta$  のスロットピッチ  $p$  依存性を示す図である。横軸は隣接スロット間のピッチ  $p$  [cm]、縦軸は放射角度  $\theta$  [°] である。ただし、管内波長  $\lambda_g = 12$  [cm] とした。

【0032】なお、ラジアルアンテナ30の放射面をなす導体板31には、図8(a)に示すように、対をなすスロット34A、34Bをハの字形をなすように形成してもよい。ここで、図8(b)に示すように、導体板31の中心をO、略径方向に隣り合う2つのスロット34Aの中心をそれぞれ34A1、34A2、略径方向に隣り合う2つのスロット34Bの中心をそれぞれ34B1、34B2とすると、O-34A1間距離とO-34B1間距離との差を略  $\lambda_g/4$  とする。34A2、34B2についても同様とする。また、上述した径方向における隣接スロット間のピッチ  $p$  は、O-34A1間距離とO-34A2間距離との差又はO-34B1間距離とO-34B2間距離との差により定義され、このように定義されたピッチ  $p$  を上述した(5)式を満たすと共に  $N \neq \alpha$  となるように設計することにより、導体板31の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射させることができる。この際、図8(a)に示すように、スロット34A、34Bの対を螺旋状に形成してもよい。

【0033】次に、図1に示したエッチング装置の動作を説明する。基板21を載置台22の上面に置いた状態で、処理容器11内を例えば0.01~10Pa程度の

\*軸は隣接スロット間のピッチ  $p$  [cm]、縦軸は放射角度  $\theta$  [°] である。ただし、管内波長  $\lambda_g = 4$  [cm] とした。

【0030】次に、ラジアル導波路36内に誘電体部材39が配置されていない場合、すなわちラジアル導波路36内が空気 ( $\epsilon_v = \epsilon_r = 1$ ) である場合を示す。 $\epsilon_r = 1$  のとき、(5)式は

$$\dots (9)$$

$$\dots (10)$$

真空度にする。この真空度を維持しつつ、プラズマガス供給ノズル15からプラズマガスとしてArを供給し、処理ガス供給ノズル16からCF<sub>4</sub>などのエッチングガスを流量制御して供給する。処理容器11内にプラズマガス及びエッチングガスが供給された状態で、高周波発生器45からの高周波の電磁界を矩形導波管43、矩形・同軸変換器42及び同軸線路41を介してラジアルアンテナ30に供給する。

【0034】ラジアルアンテナ30に供給された電磁界は、導体板31、32によって構成されるラジアル導波路36の中央部から外周部に向かって放射状に伝搬してゆき、導体板31に形成された多数のスロット34から少しずつ放射される。導体板31の径方向における隣接スロット間のピッチ  $p$  は、上述した(5)式を満たすと共に  $N \neq \alpha$  となるように設計されているので、導体板31の法線方向(図1ではZ軸方向)に対して傾斜する方向に電磁界が放射される。導体板31は誘電体板13に平行に配置されているので、電磁界は誘電体板13の法線方向(図1ではZ軸方向)に対して傾斜する方向に放射されることになる。この高周波の電磁界は、誘電体板13を透過して処理容器11内に導入され、処理容器11に電界を形成してArを電離させることにより、処理対象の基板21の上部空間S1にプラズマを生成する。このエッチング装置では、載置台22に負電位をバイアスすることにより、生成されたプラズマからイオンが引き出されて、基板21に対してエッチング処理が行われる。

【0035】次に、図1に示したエッチング装置の効果を、図20に示した従来のエッチング装置と対比して説明する。ここでは図1、図20に示したエッチング装置で生成されたプラズマの分布を調べるために、これらのプラズマの写真撮影を行った。図9は、この写真撮影に使用した装置の説明図である。ここで、図9(a)は図20に示したエッチング装置のラジアルアンテナ130の寸法を示す断面図、図9(b)は図1に示したエッチング装置のラジアルアンテナ30の寸法を示す断面図、図9(c)はCCDカメラの配置図である。

【0036】プラズマの写真撮影は、図9(c)に示すように、基板21、121が置かれていない載置台2

2, 122の中央部にCCDカメラ29を配置し、管内波長 $\lambda_g$ がおおよそ4cmである電磁界を処理容器11, 111内に放射したときのプラズマ生成空間S1を撮影することにより行った。このとき、従来のエッチング装置に関しては、図9(a)に示すような寸法のラジアルアンテナ130を使用した。すなわち、導体板131の直径を48cm、厚みを0.03cm、径方向における隣接スロット間のピッチ $p_2$ を4cm( $=\lambda_g$ )とし、リング部材133の高さを0.5cmとした。また、図1に示したエッチング装置に関しては、図9(b)に示すような寸法のラジアルアンテナ30を使用した。すなわち、導体板31の直径と厚み、リング部材33の高さを上記ラジアルアンテナ130と同寸法とし、導体板31の径方向における隣接スロット間のピッチ $p$ を3.5cm( $=0.875\lambda_g$ )とした。

【0037】図10は、このような条件の下でプラズマを写真撮影したときに得られた像の模式図であり、図10(a)は図20に示したエッチング装置で得られた像、図10(b)は図1に示したエッチング装置で得られた像を示している。図10(a)に示されているように、隣接スロット間のピッチ $p_2=\lambda_g$ であるラジアルアンテナ130を使用した従来のエッチング装置では、プラズマ発生領域160の中央付近に、プラズマが高密度に発生する部分161A, 161Bが観測された。これに対して、隣接スロット間のピッチ $p=0.875\lambda_g$ であるラジアルアンテナ30を使用した図1に示したエッチング装置では、図10(b)に示すように、プラズマ発生領域60にプラズマが高密度に発生する部分161A, 161Bはなく、均一に分布するプラズマが観測された。このように図1に示したエッチング装置では、従来のエッチング装置と比較して均一に分布するプラズマを生成できるので、基板21に対するエッチングの斑を抑制できるという効果が得られる。

【0038】次に、図1に示したような構造を有するラジアルアンテナ30を使用することで、プラズマの分布を改善できた理由を説明する。ラジアルアンテナ30から処理容器11に導入された電磁界の一部がプラズマ生成においても吸収されず、ラジアルアンテナ30とプラズマ生成空間S1との間の空間S2に定在波を形成し、この定在波の電界がプラズマ生成に関わっていることは、従来のエッチング装置と同様である。したがって、図1に示したエッチング装置でも、ラジアルアンテナ30からプラズマへ直接入射した電磁界の電界と、処理容器11内に形成された定在波の電界の両方がプラズマ生成に関与していると言える。

【0039】図11は、Z軸方向(図1では垂直方向)に対して垂直なプラズマ面を有するプラズマの密度変化及びこのプラズマに入射した電磁界の電界強度変化を示す概念図である。図11(a)において、横軸はプラズマと誘電体板13との境界面からZ軸方向の距離であ

り、縦軸はプラズマ密度及び電界強度である。また、Z軸に垂直にX軸を設けると、実線は電磁界の電界EのX軸方向成分(すなわち、プラズマ面に平行な方向成分)  $E_x$  の強度、点線は電磁界の電界EのZ軸方向成分(すなわち、プラズマ面の法線方向の成分)  $E_z$  の強度、一点鎖線はプラズマ密度をそれぞれ示している。プラズマ面がZ軸に対して垂直なプラズマの密度は、プラズマと誘電体板13との境界面からZ軸方向に離れるにしたがって、図11(a)の一点鎖線で示すように上昇してゆく。ここで、ある周波数に対してプラズマの誘電率がゼロになる密度を、その周波数におけるカットオフ密度という。

【0040】このようなプラズマに対して、図11

(b)に示すように電磁界をZ軸方向に対して傾斜する方向に入射させた場合、電界のX軸方向成分  $E_x$  の強度は図11(a)の実線で示すように、プラズマ密度がカットオフ密度となる地点Z1までほぼ一定値を維持するが、この地点Z1をこえると指数関数的に低下する。これに対して、電界のZ方向成分  $E_z$  の強度は図11

(a)の点線で示すように、プラズマに入射した直後から上昇し、地点Z1で極大を示してから下降に転ずる。この原理は「R.B.White, F.F.Chen, Amplification and Absorption of Electromagnetic Waves in Overdense Plasmas, Plasma Physics, vol.16, pp565-587」に記載されている。Z軸方向(すなわちプラズマ面の法線方向)に対して傾斜する方向に電磁界を入射させれば、電界のZ方向成分  $E_z$  ができるので、Z軸方向に入射させた場合と比較して、両成分  $E_x$ ,  $E_z$  を合成した電界強度を大きくすることができる。

【0041】図1に示したエッチング装置では、ラジアルアンテナ30からの電磁界は垂直方向(Z軸方向)に対して傾斜する方向に放射され、水平配置された誘電体板13の法線方向(Z軸方向)に対して所定の角度をもって入射する。一方、処理容器11内のプラズマ生成空間S1は誘電体板13により制約されるので、誘電体板13と対向するプラズマ面はこの誘電体板13に沿った形状となり水平面となる。したがって、ラジアルアンテナ30から放射された電磁界は、誘電体板13と対向するプラズマ面の法線方向(Z軸方向)に対して傾斜する方向に入射することになる。

【0042】したがって、上述した原理にしたがえば、ラジアルアンテナ30を使用することにより、プラズマ生成空間S1に従来のより大きな電界を形成できるので、ラジアルアンテナ30から直接入射した電磁界の電界によるプラズマ生成効率を向上させることができる。これにより、ラジアルアンテナ30から直接入射した電磁界の電界によるプラズマ生成への寄与が大きくなり、処理容器11内の空間S2に形成される定在波の電界によるプラズマ生成への関与が相対的に低くなる。

【0043】ラジアルアンテナ30からプラズマへ直接

入射した電磁界の電界によるプラズマの生成は、比較的容易に制御できる。例えば、放射面（導体板 31）に形成される各スロットの長さを径方向で調整して、各スロットから放射される電界の強度を適当に調整することで、プラズマの生成を制御できる。これに対して、定在波の電界によるプラズマの生成は制御が困難である。図 1 に示したエッチング装置では、上述したように、直接入射した電磁界の電界によるプラズマ生成を、定在波の電界によるプラズマ生成よりも優勢にすることができるので、所望のプラズマ分布となるようにプラズマの生成を制御することができる。よって、図 10 (b) に示したような均一なプラズマ分布を得ることができた。

【0044】図 12 は、電磁界の吸収係数の角度依存性を示す図である。横軸は電磁界の放射角度  $\theta$ （図 3 参照）の余弦であり、縦軸は吸収係数  $\eta$  である。この図から、プラズマ中の電子密度  $n_e$  にもよるが、放射角度  $\theta$  がおよそ  $30^\circ \sim 50^\circ$  において吸収係数が最大となることが分かる。したがって、このような角度  $\theta$  で電磁界を放射することにより、ラジアルアンテナ 30 から直接入射した電磁界によるプラズマ生成が支配的になるので、プラズマ分布の制御を正確に行うことができる。なお、隣接スロット間のピッチ  $p$  は、径方向（すなわち、ラジアル導波路 36 内における電磁界の伝搬方向）で一定であってもよいし、変化していてもよい。径方向で隣接スロット間のピッチ  $p$  に変化をつけると、この径方向で電磁界の放射方向が変化する。図 12 から分かるように、電磁界の放射方向が変化すれば電磁界の吸収係数も変化するので、径方向でプラズマの生成効率を制御して \*

$$p/\lambda_g + (p \cdot \cos \theta)/\lambda_a = N \quad \dots (11)$$

ここで、 $\lambda_a$  はアンテナ 30 の外部を伝搬する電磁界 51A、51B の波長、 $N$  は 0 以上の整数である。 \* 30 ※ 【0047】真空中における電磁界の波長を  $\lambda$  とする

$$\lambda_g = \lambda/\epsilon_v^{1/2}, \quad \lambda_a = \lambda/\epsilon_a^{1/2} \quad \dots (12)$$

で表されるので、この (12) と、(2) 式で定義した  $p = \alpha \cdot \lambda_g$  とを (11) 式に代入して整理すると、

$$\cos \theta = (\epsilon_v/\epsilon_a)^{1/2} \cdot [(N/\alpha) - 1] \quad \dots (13)$$

となる。 $\epsilon_v/\epsilon_a = \epsilon_r$  とすると、(13) 式は、

$$\cos \theta = \epsilon_r^{1/2} [(N/\alpha) - 1] \quad \dots (14)$$

となる。

$$-1 \leq \epsilon_r^{1/2} [(N/\alpha) - 1] \leq 1 \quad \dots (15)$$

の関係を満たす必要がある。このとき、角度  $\theta$  が

$$\theta = \cos^{-1} [\epsilon_r^{1/2} [(N/\alpha) - 1]] \quad \dots (16)$$

となる方向で電磁界 51A、51B の位相がそろい、この方向に電磁界が放射されることになる。したがって、電磁界の放射に関して、以下の事項が導き出される。

【0049】1.  $N=0$  の場合： $\theta = \cos^{-1}(-\epsilon_r^{1/2})$  であるから、

①  $\epsilon_r > 1$  の場合、解がなく、電磁界は放射されない。

②  $\epsilon_r = 1$  の場合、 $\theta = 180^\circ$  となり、水平方向に電磁界 51A、51B が放射される。

$$N \geq \alpha \cdot [1 - (1/\epsilon_r^{1/2})] \quad \dots (17)$$

\* プラズマ分布を調整することができる。

【0045】以上ではラジアルアンテナ 30 を用いた例を説明したが、これに限定されるものではなく、他のスロットアンテナ、例えば矩形導波路アンテナを用いても同様の効果を得られる。図 13 は、本発明に使用可能な矩形導波路アンテナアレーの構成を示す斜視図である。このアンテナアレーは、矩形導波路の一面に複数のスロット 74 が形成された矩形導波路アンテナ 70 を、その短め方向に連続配置したものである。ここで、矩形導波路アンテナ 70 のスロット 74 は、矩形導波路内における電磁界の伝搬方向に等間隔に形成され、隣接スロット間のピッチ  $p$  は、上述した (5) 式を満たすと共に  $N \neq \alpha$  となるように設計されている。なお、スロットを図 8 に示したようにハの字形に形成してもよい。また、隣接スロット間のピッチ  $p$  を、矩形導波路内における電磁界の伝搬方向で変化をつけてもよい。図 13 において、81 は高周波発生器（図示せず）に接続された電磁界分配用の矩形導波路である。

【0046】（第 2 の実施の形態）ラジアルアンテナ 30 の放射面（導体板 31）に多数形成されるスロット 34 のピッチ  $p$  の設計方法に関し、第 1 の実施の形態では、アンテナ 30 外部の等価比誘電率  $\epsilon_a$  を 1 に近似したときの設計方法について説明したが、ここではそれを一般論に拡張して説明する。図 3 において、A 点から放射される電磁界 51A と、A 点から B 点を経由して C 点に達する電磁界 51B とが同じ位相となる条件は、(11) 式に示すようになる。

30 ※ 【0047】真空中における電磁界の波長を  $\lambda$  とする

$p = \alpha \cdot \lambda_g$  とを (11) 式に代入して整理すると、

【0048】この (14) 式より、 $\epsilon_r$ 、 $N$ 、 $\alpha$  は

③  $\epsilon_r < 1$  の場合、電磁界は  $\epsilon_r$  に依存した角度  $\theta$  に放射される。

【0050】2.  $N$  が 1 以上で、 $N = \alpha$  の場合： $\cos \theta = 0$  すなわち  $\theta = (2M-1)\pi/2$  ( $M$  は自然数) となり、垂直方向に電磁界 51A、51B が放射されることになる。

【0051】3.  $N$  が 1 以上で、 $N \neq \alpha$  の場合：(15) 式を変形すると、次の 2 式が得られる。

17

$$N \leq \alpha \cdot [1 + (1/\epsilon_r^{1/2})]$$

①  $\epsilon_r > 1$  の場合

$$(17) \text{ 式から、} \alpha \leq N/[1 - (1/\epsilon_r^{1/2})]$$

$$(18) \text{ 式から、} \alpha \geq N/[1 + (1/\epsilon_r^{1/2})]$$

したがって、 $N$ と $\alpha$ との関係は、

$$N/[1 + (1/\epsilon_r^{1/2})] \leq \alpha \leq N/[1 - (1/\epsilon_r^{1/2})]$$

となる。

【0052】

②  $\epsilon_r < 1$  の場合

$$(17) \text{ 式から、} \alpha \geq N/[1 - (1/\epsilon_r^{1/2})]$$

ただし、(2) 式より、 $\alpha > 0$ 

$$(18) \text{ 式から、} \alpha \leq N/[1 + (1/\epsilon_r^{1/2})]$$

したがって、 $N$ と $\alpha$ との関係は、

$$0 \leq \alpha \leq N/[1 + (1/\epsilon_r^{1/2})]$$

となる。

\* (15) 式より

【0053】③  $\epsilon_r = 1$  の場合

$$-1 \leq (N/\alpha) - 1 \leq 1$$

となるので、 $N$ と $\alpha$ との関係は、

$$\alpha \geq N/2$$

となる。

【0054】以上より、ラジアルアンテナ30の放射面（導体板31）に形成されるピッチ $p$ の設計に関して、次のように言える。すなわち、径方向における隣接スロット間のピッチ $p$ を(15)式を満たすように設計することにより、所定の角度 $\theta$ に電磁界を放射させることができる。この放射角度 $\theta$ は、ラジアルアンテナ30の内外の比誘電率の比 $\epsilon_r$ によって決定される。ただし、 $N$ が1以上で $N = \alpha$ （ $= p/\lambda_g$ ）の場合には、放射面に対して垂直方向に電磁界が放射されるので、 $N$ が1以上の場合には $N \neq \alpha$ となるようにピッチ $p$ を設計することにより、垂直方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射させることができる。以上説明したように、プラズマ処理※

$$\epsilon_a = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 / [\epsilon_1 \cdot (1 - \beta) + \epsilon_2 \cdot \beta]$$

で求められる。ここで、

$$\beta = d_1/d$$

である。

【0056】いま、図15に示すように、誘電体板13とラジアルアンテナ30の放射面との距離を $d_2$ から $\Delta d$ だけ小さくすると、 $d$ も $\Delta d$ だけ小さくなるので(28)式より $\beta$ が大きくなり、 $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ の場合には $\epsilon_a$ が変化する。一方、(16)式から分かるように、放射角度 $\theta$ はラジアルアンテナ30の内外の比誘電率の比 $\epsilon_r = \epsilon_v/\epsilon_a$ で決定されるので、 $\epsilon_a$ が変化するれば放射角度 $\theta$ も変化する。したがって、ラジアルアンテナ30を上下に動かして、誘電体板13からラジアルアンテナ30の放射面までの距離を変えることにより、放射角度 $\theta$ を制御することができる。

【0057】図16は、ラジアルアンテナ30を上下に動かしたときのプラズマ分布の変化を示す概念図である。横軸は処理容器11の中心軸(O)から半径方向への距離であり、縦軸はプラズマ密度である。この図から

18

... (18)

... (19)

... (20)

... (21)

... (22)

... (23)

... (24)

... (25)

... (26)

※装置の使用状況に応じて変化するラジアルアンテナ30外部の等価誘電率 $\epsilon_a$ を考慮し、アンテナ30の内外の比誘電率の比 $\epsilon_r$ に基づいてピッチ $p$ を設計することにより、適切なスロット配置を得られる。

【0055】（第3の実施の形態）図14は、図1に示したラジアルアンテナ30から誘電体板13に至る一部構成を拡大して示す断面図である。誘電体板13の厚みと比誘電率をそれぞれ $d_1$ 、 $\epsilon_1$ 、この誘電体板13とラジアルアンテナ30の放射面（導体板31）との間の距離と比誘電率をそれぞれ $d_2$ 、 $\epsilon_2$ とし、 $d_1 + d_2 = d$ とする。この場合、ラジアルアンテナ30外部の等価比誘電率 $\epsilon_a$ は、

$$\epsilon_a = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 / [\epsilon_1 \cdot (1 - \beta) + \epsilon_2 \cdot \beta]$$

$$\beta = d_1/d$$

分かるように、誘電体板13からラジアルアンテナ30の放射面までの距離を $d_2 - \Delta d$ 、 $d_2$ 、 $d_2 + \Delta d$ （ $\Delta d$ は数mm程度）と変化させることにより、それに応じてプラズマ分布が変化する。以上より、誘電体板13からラジアルアンテナ30の放射面までの距離を変えて、電磁界の放射方向を変えることにより、プラズマの分布を調整できると言える。

【0058】（第4の実施の形態）図17は、本発明の第4の実施の形態であるエッチング装置の構成を示す図である。この図において、図1と同一部分を同一符号をもって示し、適宜その説明を省略する。このエッチング装置では、ラジアルアンテナ30の放射面（導体板31）に対向配置される誘電体板13Aが、ドーム状をしている。したがって、この誘電体板13Aは、ラジアルアンテナ30の放射面に対して傾斜する面を有している。なお、誘電体板13Aは、載置台22の載置面に対

して垂直な中心軸に対して、対称な形状をしている。

【0059】処理容器11内のプラズマ生成空間S1は誘電体板13Aにより制約されるので、誘電体板13Aと対向するプラズマ面はこの誘電体板13Aに沿った曲面となる。このプラズマ面の法線方向は、中心軸付近を除き、鉛直方向(Z軸方向)に対して傾斜しているの  
で、仮に電磁界を鉛直方向(Z軸方向)に放射しても、その電磁界はプラズマ面の法線方向に対して傾斜する方向に入射することになる。このように、ドーム状の誘電体板13Aを用いることにより、図1に示したエッチング装置と同様の条件を作り出すことが可能である。

【0060】しかし、3~30mmという比較的薄い誘電体板をドーム状に成形すると、曲率が必要以上に大きくなり、所望の曲率に成形することができない場合がある。一方、比較的厚い誘電体板を用いれば曲率を小さくすることは可能であるが、電磁界の損失が大きくなってしまふ。そこで、誘電体板13Aの曲率が必要以上に大きい場合には、放射面(導体板31)の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射するラジアルアンテナ30を用いて、誘電体板13Aへの電磁界の入射角を小さくするとよい。このようにして処理容器11内における電界強度の分布を調整することにより、プラズマの分布を改善することができる。ここで、径方向で隣接スロット間のピッチpに変化をつけて、この方向で電磁界の放射方向に分布をもたせることにより、プラズマの分布を調整してもよい。なお、誘電体板13Aは、ラジアルアンテナ30の放射面(導体板31)に対して傾斜する面を有していればよいので、上又は下に凸の円錐面状など、他の凸形状であってもよい。

【0061】(第5の実施の形態)図18は、本発明の第5の実施の形態であるエッチング装置の構成を示す図である。この図において、図1及び図17と同一部分を同一符号をもって示し、適宜その説明を省略する。このエッチング装置は、ドーム状の誘電体板13Aに代えて、処理位置にある基板21の周囲を覆う半球状又はドーム状のベルジャー18を有している。具体的には、半球状又はドーム状のベルジャー18の開口部を下側にして処理位置上方からかぶせ、処理位置下方の処理容器11側壁にベルジャー18の開口部を固定した構造となっている。したがって、プラズマが比較的高密度で存在する空間に近接する処理容器11Aの側壁は、ベルジャー18により載置台22Aから隔離される。このベルジャー18は、厚さ3~30mm程度の石英ガラス又は(A1<sub>2</sub>O<sub>3</sub>又はAlN等の)セラミックなどの誘電体で形成されている。また、処理容器11とベルジャー18との接合部には、Oリングなどのシール部材12Aを介在させている。

【0062】基板21が配置される載置台22Aは、処理容器11Aの底部を遊貫する昇降軸28によって支持され、上下動自在となっている。基板を搬入搬出口19

から搬入又は搬出するときは、載置台22Aを下に降ろし、エッチング処理を行うときは、載置台22Aを上げて基板21を処理位置に配置することができる。処理容器11の底部には、セラミックなどからなる絶縁板24Aが設けられている。また、処理容器11Aとベルジャー18とで形成された処理室の気密性を確保するため、載置台22Aと絶縁板24Aとの間に、昇降軸28を囲むようにベローズ29が設けられている。さらに、処理容器11Aの底部には、真空ポンプ(図示せず)に接続された排気口14Aが設けられ、処理容器11Aの側壁には、処理室内にプラズマガス及びエッチングガスを導入するためのノズル15Aが設けられている。このノズル15Aは基板12の処理位置の上側までのびており、ガスが載置台22Aの上部空間に放出されるようになっている。

【0063】上述したように、ベルジャー18は半球状又はドーム状をしており、ラジアルアンテナ30の放射面(導体板31)に対して傾斜する面を有している。したがって、図17に示したエッチング装置と同様に、放射面の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射するラジアルアンテナ30を用いて、処理室における電界強度の分布を調整することにより、プラズマの分布を改善することができる。また、プラズマ生成空間S1を含むプラズマが比較的高密度で存在する空間に近接する領域では、処理容器11Aの側壁がベルジャー18でカバーされているので、生成されたプラズマが処理容器11Aの側壁に接触して表面をスパッターすることによって起こる処理室内の汚染を抑制することができる。なお、半球状又はドーム状のベルジャーが載置台22Aの載置面に乗る構造にして、載置台22Aとベルジャーとにより処理室が形成されるようにしてもよい。

【0064】(第6の実施の形態)以上では、本発明をエッチング装置に適用した例を説明してきたが、例えばプラズマCVD(chemical vapor deposition)装置などの他のプラズマ処理装置に本発明を適用してもよい。そこで次に、本発明をCVD装置に適用した例を説明する。図19は、本発明の第6の実施の形態であるCVD装置の構成を示す図である。この図において、図1及び図18と同一部分を同一符号をもって示し、適宜その説明を省略する。このCVD装置は、基板21を加熱するヒーター91や、処理室内にSiH<sub>4</sub>とH<sub>2</sub>との混合ガスなどを導入するガス供給ノズル92など、CVD装置に必要な構成を有するほか、放射面の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射するラジアルアンテナ30と、処理位置にある基板21の周囲を覆う半球状又はドーム状のベルジャー(第1の誘電体部材)18とを備え、図19に示したエッチング装置と同様の特徴を有している。

【0065】また、このCVD装置では、処理容器11Aの上部開口が誘電体板(第2の誘電体部材)13で密

閉されている。また、ベルジャー 18 と誘電体板 13 と処理容器 11 A とによって囲まれた密閉空間に所定温度のガスを流通させてベルジャー 18 を温度調整するために、流通手段としてノズル 93 と排気口 94 とが処理容器 11 A の側壁に設けられている。ノズル 93 から導入されるガスには、高周波電磁界を吸収しにくいガスとして例えば  $N_2$  が用いられる。このガスの温度は、ベルジャー 18 よりも高い温度に設定され、その上限は  $600^\circ C$  とする。

【0066】図 19 に示した CVD 装置の動作を説明する。まず、ヒーター 91 を  $150^\circ C$  程度にして基板 21 を加熱した状態で、ガス供給ノズル 92 から処理室内に  $SiH_4$  と  $H_2$  との混合ガスを導入する。ラジアルアンテナ 30 から処理室内に電磁界を供給すると、 $SiH_4$  が解離して  $SiH_x$  ( $x=1, 2, 3, 4$ ) となり、この  $SiH_x$  が基板 21 の表面で反応してアモルファス  $Si$  (以下、 $a-Si$  と略記する) が成膜される。このとき、ベルジャー 18 が常温であれば、ベルジャー 18 の内面に  $SiH_x$  が付着し、 $a-Si$  が成膜される。この  $a-Si$  によってラジアルアンテナ 30 からの電磁界の導入が阻害されることになる。しかし、ベルジャー 18 と誘電体板 13 との間の空間に  $600^\circ C$  以下の温度、例えば  $150^\circ C \sim 300^\circ C$  の  $N_2$  を流通させてベルジャー 18 を加温することにより  $SiH_x$  が付着しにくくなるので、ベルジャー 18 内面における  $a-Si$  の成膜を低減できる。したがって、ベルジャー 18 を介して処理室内に導入される電磁界の損失を低減し、効率よくプラズマを生成して成膜を行うことができる。

【0067】なお、ベルジャー 18 と誘電体板 13 と処理容器 11 A とによって囲まれた密閉空間に流通させる流体は、ガスに限らず、液体であってもよい。この場合、例えばガルデン (パーフルオロポリエーテル) 又はフロリケートなど、高周波電磁界を吸収しにくい液体を用いることが好ましい。また、上記の温度より低温の流体を密閉空間に流通させて、ベルジャー 18 を冷却するようにしてもよい。電磁界的作用によってベルジャー 18 の温度が高くなりすぎると、ベルジャー 18 が破損する原因となる。また、図 18 に示したエッチング装置では、ベルジャー 18 の輻射熱で基板 21 上のレジストが焼け、所望のパターンにエッチンできないことがある。しかし、このようにしてベルジャー 18 を冷却することにより、上記の問題を回避することができる。また、ベルジャー 18 と共に密閉空間を形成する第 2 の誘電体部材は、ベルジャー 18 に対して載置台 22 A 又は基板 21 と異なる側に配置されればよい。したがって、ラジアルアンテナ 30 の給電線である同軸線路 41 の途中に第 2 の誘電体部材を詰めて密閉空間を形成してもよい。この場合、ラジアルアンテナ 30 の内部にも流体が流通することになる。

【0068】

【発明の効果】以上説明したように、本発明は、スロットアンテナから処理容器内に電磁界を放射する際に、アンテナ放射面の法線方向に対して傾斜する方向に電磁界を放射するものである。これにより、スロットアンテナから直接入射する電磁界によるプラズマ生成を、処理容器内で形成される定在波の電界によるプラズマ生成よりも優勢にすることができる。前者は後者よりも制御が容易であるので、プラズマの分布を従来よりも改善することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 の実施の形態であるエッチング装置の構成を示す図である。

【図 2】 ラジアルアンテナの放射面をなす第 1 の導体板の一構成例を示す図である。

【図 3】 第 1 の導体板の径方向における隣接スロット間のピッチ  $p$  の設計方法の説明図である。

【図 4】 比誘電率  $\epsilon_r \approx 9$  のときの  $N$  と  $\alpha$  との関係を棒グラフで表した図である。

【図 5】 比誘電率  $\epsilon_r \approx 9$  のときにおける放射角度  $\theta$  のスロットピッチ  $p$  依存性の一例を示す図である。

【図 6】 比誘電率  $\epsilon_r \approx 1$  のときの  $N$  と  $\alpha$  との関係を棒グラフで表した図である。

【図 7】 比誘電率  $\epsilon_r \approx 1$  のときにおける放射角度  $\theta$  のスロットピッチ  $p$  依存性の一例を示す図である。

【図 8】 ラジアルアンテナの放射面をなす第 1 の導体板の他の構成例を示す図である。

【図 9】 プラズマの写真撮影に使用した装置の説明図である。

【図 10】 プラズマを写真撮影したときに得られた像の模式図である。

【図 11】 Z 軸方向に対して垂直なプラズマ面を有するプラズマの密度変化及びこのプラズマに入射した高周波の電界強度変化を示す概念図である。

【図 12】 電磁界の吸収係数の角度依存性を示す図である。

【図 13】 本発明に使用可能な矩形導波路アンテナレーの構成を示す斜視図である。

【図 14】 図 1 に示したラジアルアンテナから誘電体板に至る一部構成を拡大して示す断面図である。

【図 15】 図 14 に示した誘電体板とラジアルアンテナの放射面との距離を狭めたときの断面図である。

【図 16】 ラジアルアンテナを上下に動かしたときのプラズマ分布の変化を示す概念図である。

【図 17】 本発明の第 4 の実施の形態であるエッチング装置の構成を示す図である。

【図 18】 本発明の第 5 の実施の形態であるエッチング装置の構成を示す図である。

【図 19】 本発明の第 6 の実施の形態であるエッチング装置の構成を示す図である。

【図 20】 従来の高周波プラズマ処理装置を用いたエ

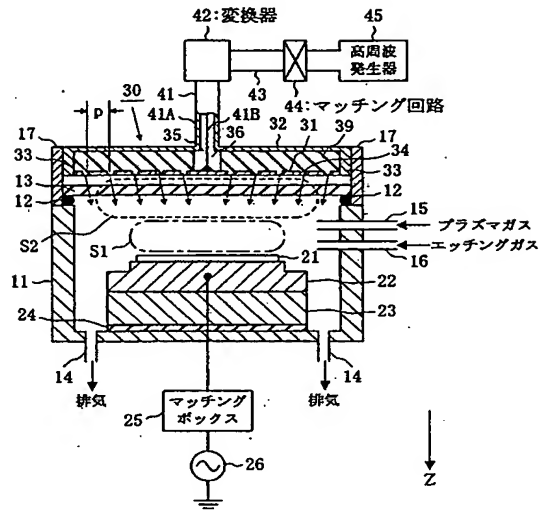
23

ッティング装置の構成図である。

【符号の説明】

11…処理容器、13…誘電体板、21…基板、22…

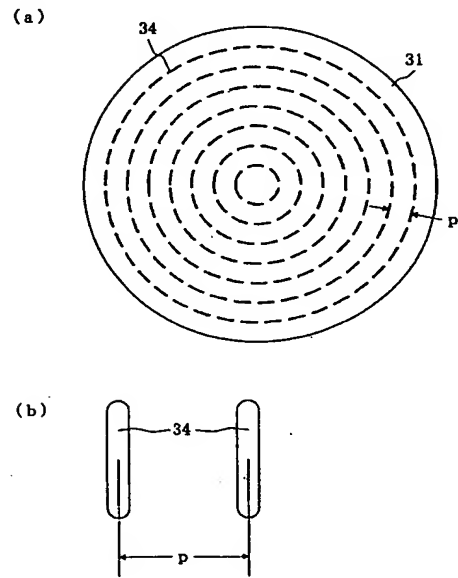
【図1】



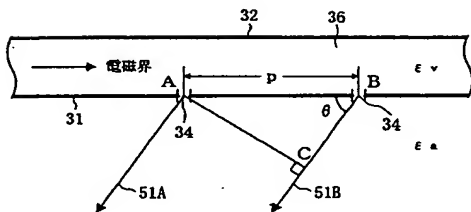
24

載置台、30…ラジアルアンテナ、31、32…導  
板、34、34A、34B、74…スロット、35…導  
入口、70…矩形導波路アンテナ。

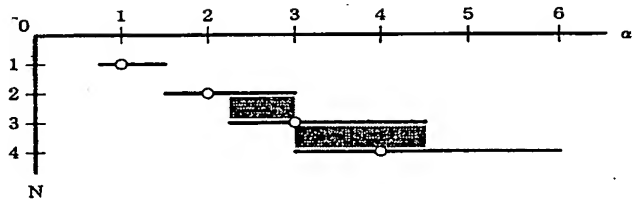
【図2】



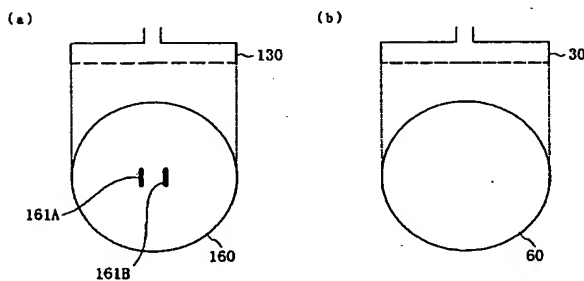
【図3】



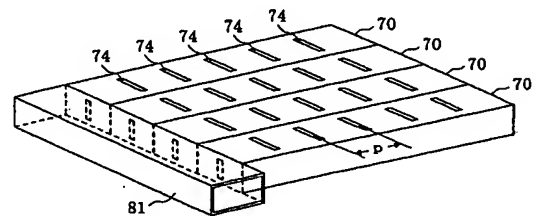
【図4】



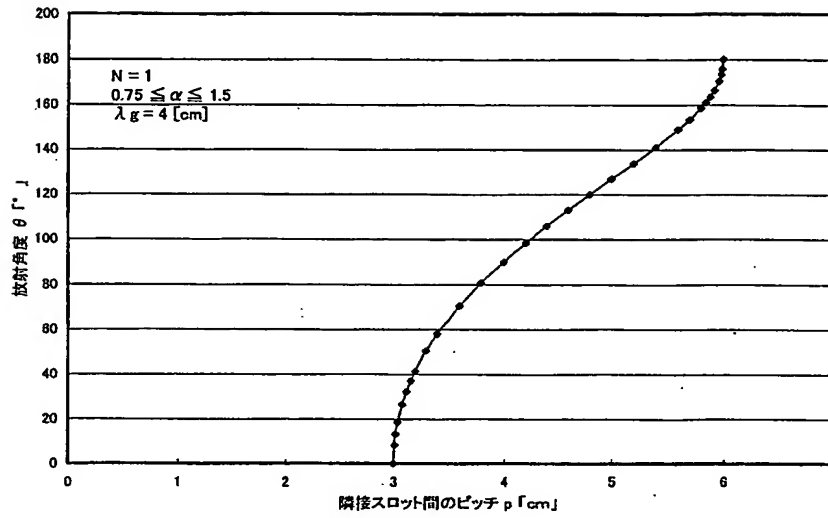
【図10】



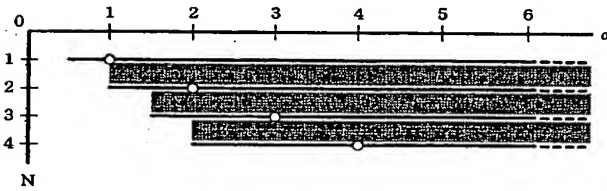
【図13】



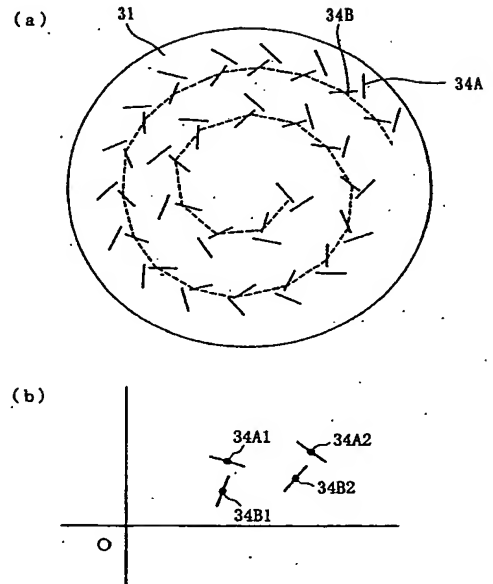
【図5】



【図6】

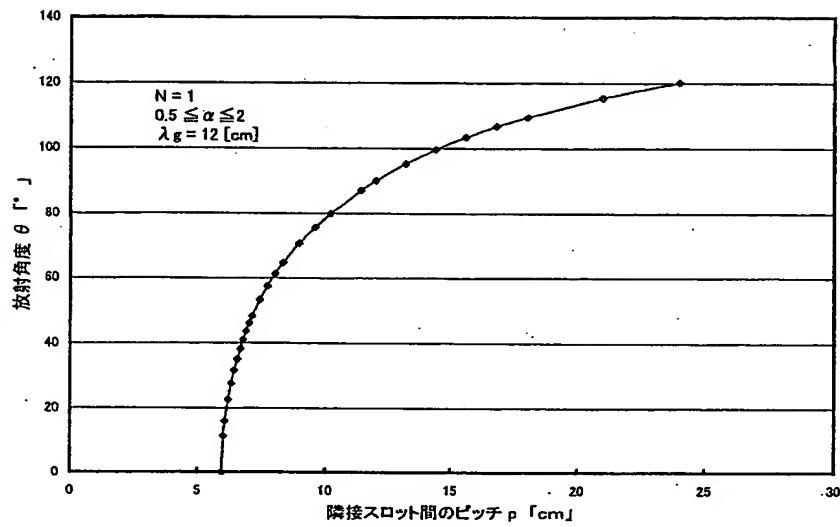


【図8】

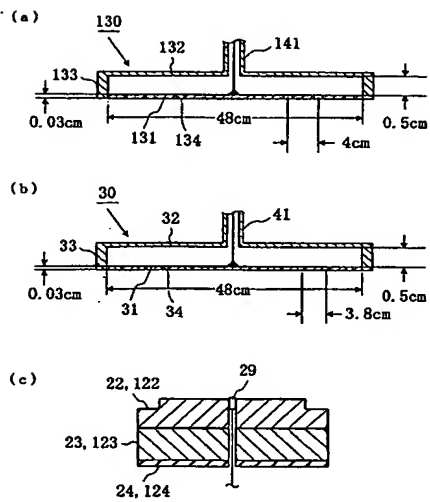




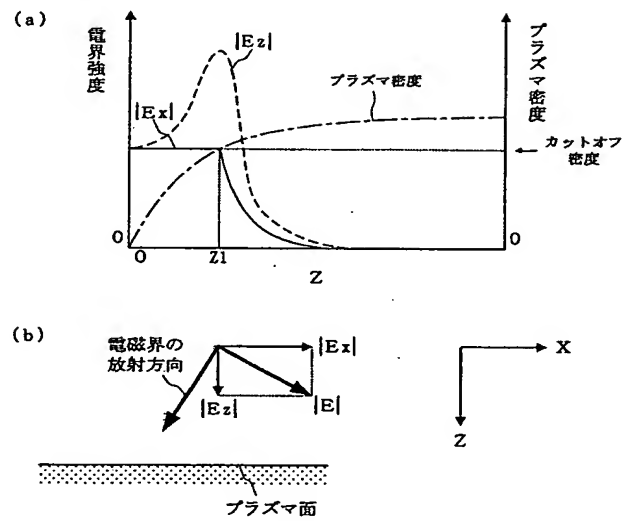
【図7】



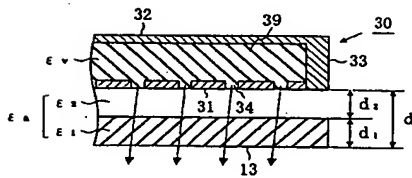
【図9】



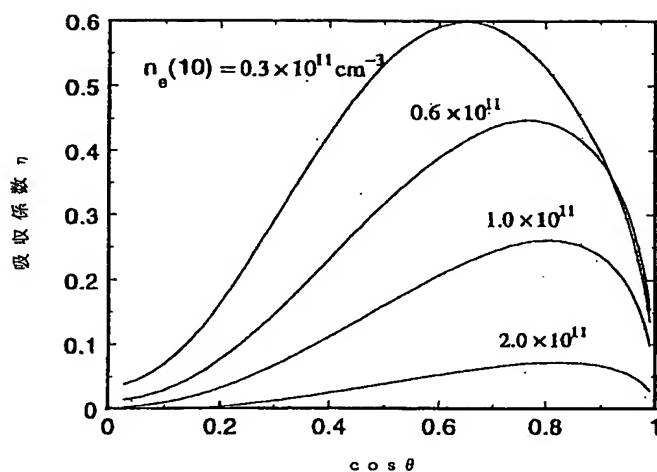
【図11】



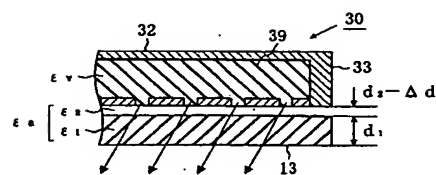
【図14】



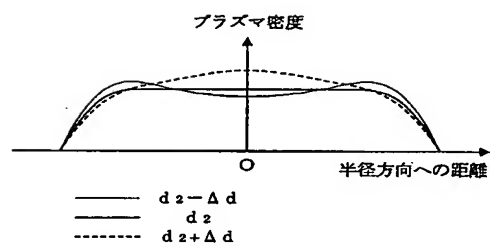
【図12】



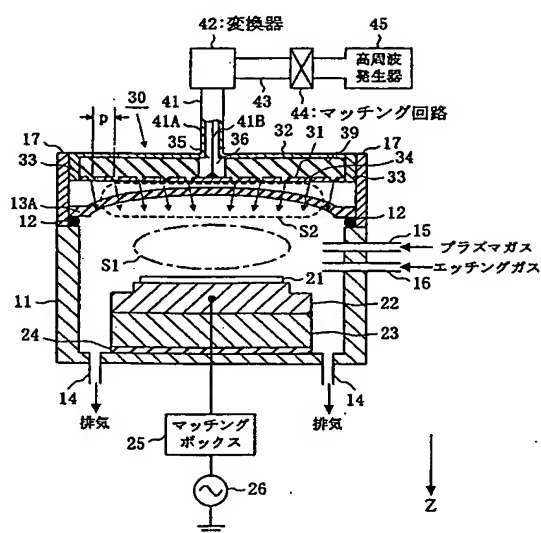
【図15】



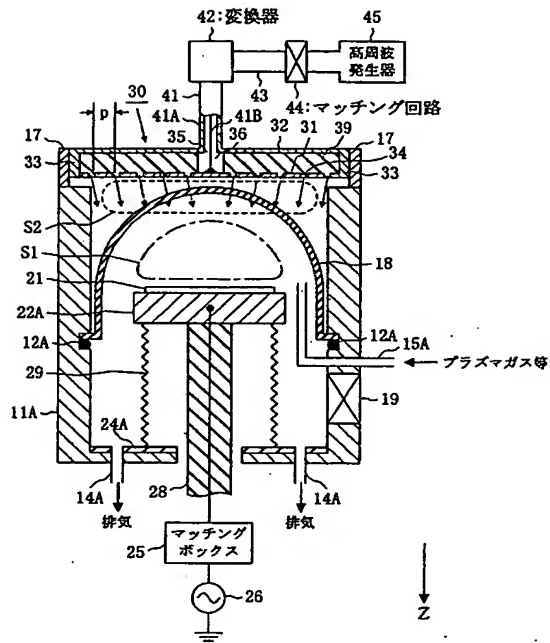
【図16】



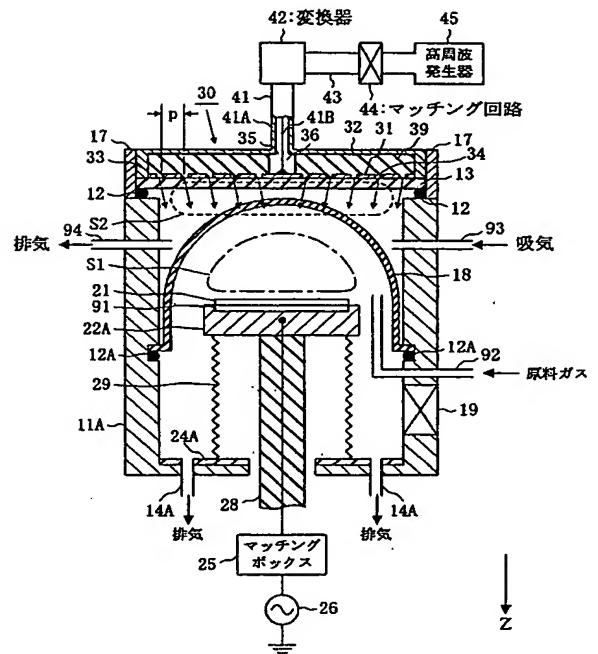
【図17】



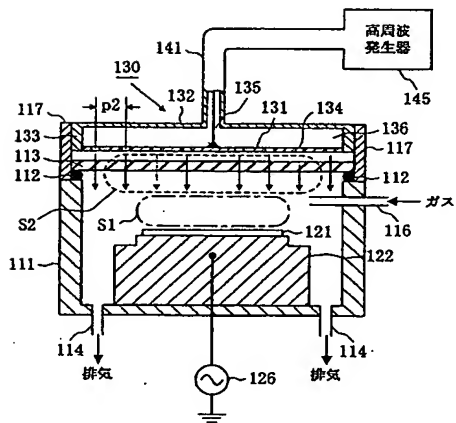
【図18】



【図19】



【図20】



フロントページの続き

Fターム(参考) 4G075 AA24 AA30 AA61 BC01 BC04  
BC06 CA24 CA25 CA47 EA01  
EB01 EB41 EC30 FC15  
4K030 FA03 JA14 KA10 KA15 KA30  
KA46  
5F004 BA20 BB11 BB32 DA01 DA23  
5F045 AA09 AB04 AC01 AC15 AD05  
AD06 AD07 BB15 DP04 EB02  
EH02 EH03 EJ01

2



US005579019A

**United States Patent** [19]  
**Uematsu et al.**

[11] **Patent Number:** 5,579,019  
[45] **Date of Patent:** Nov. 26, 1996

- [54] **SLOTTED LEAKY WAVEGUIDE ARRAY ANTENNA**
- [75] **Inventors:** Masahiro Uematsu, Kimitsu; Takashi Ojima, Chiba; Nobuharu Takahashi, Tokyo; Naohisa Goto, 15-1-A514, Tsuchihashi-6-chome, Miyamae-ku, Kawasaki-shi; Jiro Hirokawa, Tokyo; Makoto Ando, Kawasaki, all of Japan
- [73] **Assignees:** Nippon Steel Corporation, Tokyo; Naohisa Goto, Kawasaki, both of Japan
- [21] **Appl. No.:** 580,787
- [22] **Filed:** Dec. 29, 1995

of Electronics, Information and Communication Engineers), AP88-40, Jul. 1988.

Ohmaru "Mobile Reception Apparatus for Broadcast by Satellite", Broadcasting Technology, vol. 43, No. 9, pp. 119-123, Sep. 1990.

Kuramoto, et al. "Antenna System for Mobile DBS Reception", Proceedings of the General Meeting of IEICE in Spring, 1991, B-59, Mar. 1991.

Nishikawa "Mobile Antenna System for Receiving Broadcast by Satellite", Toyoda Chuo Research R&D Review, vol. 27, No. 1, p. 65, Mar. 1992.

Hirokawa, et al. "Design of Slotted Leaky Waveguide Array Antenna", Technical Report of IEICE, AP92-37, 1992-5.

Nakano, et al. "Curl Antenna (III) Beam Tilt", Proceedings of the General Meeting of IEICE in Spring, B-45, Mar. 1993.

**Related U.S. Application Data**

- [63] Continuation of Ser. No. 169,215, Dec. 20, 1993, abandoned.

**Foreign Application Priority Data**

- Oct. 7, 1993 [JP] Japan ..... 5-276152
- [51] **Int. Cl.<sup>6</sup>** ..... H01A 13/10
- [52] **U.S. Cl.** ..... 343/771; 343/770
- [58] **Field of Search** ..... 343/771, 767, 343/770; H01Q 13/10, 13/18, 13/20, 13/22

**References Cited**

**U.S. PATENT DOCUMENTS**

- 3,032,762 5/1962 Kerr ..... 343/771
- 3,701,162 10/1972 Seaton ..... 343/771
- 4,916,458 4/1990 Goto ..... 343/771

**FOREIGN PATENT DOCUMENTS**

- 0029004 1/1989 Japan ..... H01Q 13/10
- 5129828 5/1993 Japan ..... H01Q 13/22

**OTHER PUBLICATIONS**

Furukawa, et al. "Beam Tilt Type Planar Antenna Using Waveguide of Single-Layer Structure for Receiving Broadcast by Satellite", Technical Report of IEICE (The Institute

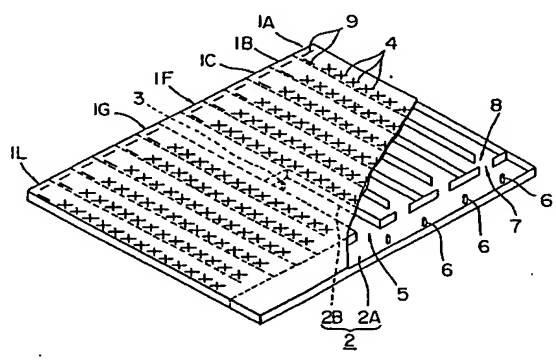
(List continued on next page.)

*Primary Examiner*—Donald T. Hajec  
*Assistant Examiner*—Tho Phan  
*Attorney, Agent, or Firm*—Pollock, Vande Sande & Priddy

[57] **ABSTRACT**

A slotted leaky waveguide array antenna of a one-axis tracking type wherein a feed section including a feed probe is kept in a stationary state to thereby keep a converter in a stationary state and a desired beam width is set in a tilt direction, includes a plurality of radiation waveguides arranged adjacent and parallel to each other, each of which has a plurality of slots arranged in a waveguide axial direction, and a feed waveguide for distributing to the respective radiation waveguides electromagnetic waves received through a feed section from a converter, and the antenna rotates in a substantially horizontal plane to track an azimuth direction, wherein the feed waveguide has a first section extended along one ends of the radiation waveguides and a second section extended from the feed section provided in the rotary center of the slotted leaky waveguide array antenna to the center of the first section, and wherein the radiation waveguides are formed with crossed slots having an identical offset, and the number of the crossed slots is preferably selected between 13 and 17.

**12 Claims, 12 Drawing Sheets**



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**